

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 196 41 288 A 1

61 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
C 23 F 4/00  
H 01 L 21/3065

21 Aktenzeichen: 196 41 288.9  
22 Anmeldetag: 7. 10. 96  
43 Offenlegungstag: 9. 4. 98

DE 196 41 288 A 1

71 Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:  
Laermer, Franz, Dr., 70437 Stuttgart, DE; Schilp,  
Andrea, 73525 Schwaebisch Gmund, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE 42 41 453 C2  
DE 42 41 045 C1  
DE 44 20 962 A1  
DE 43 17 623 A1  
DE 42 02 447 A1  
US 48 55 017  
US 47 84 720

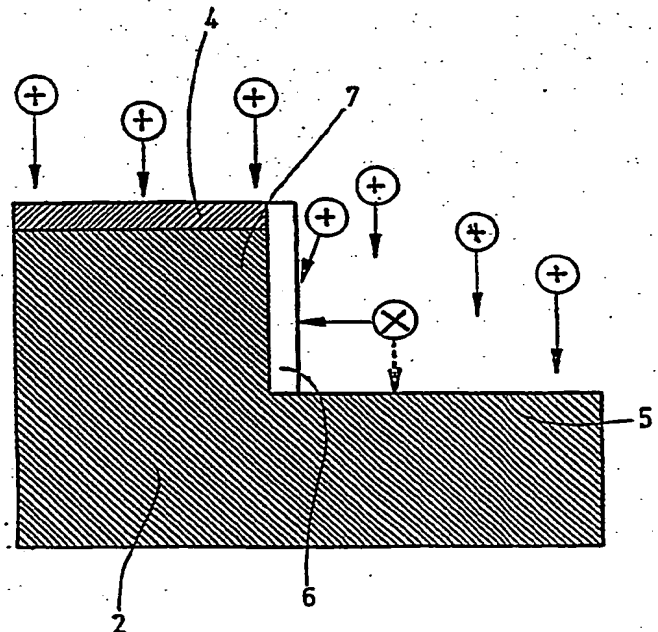
TAKANO, H. et al.: Surface characterization of  
sidewall protection film on GaAs steep via  
holes etched by magnetron ion etching. In:  
J. Vac. Sci. Technol. B 14(1), Jan./Feb. 1996,  
S. 112-117;

SU, Y. K.: A STUDY OF SELECTIVE AND  
NONSELECTIVE  
REACTIVE ION ETCHING OF GaAs/AlGaAs  
MATERIALS.  
In: Solid-State Electronics, Vol. 36, No. 12,  
pp. 1779-1785;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen verschiedener Substrate

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung von  
geätzten Strukturen in Substraten mittels anisotropen  
Plasmaätzens, wobei getrennt voneinander und alternie-  
rend ein an sich isotroper Ätzvorgang und eine Seiten-  
wandpassivierung durchgeführt wird, wobei das Substrat  
(2) ein Polymer, ein Metall oder ein Mehrkomponentens-  
system ist und Anteile (8) der während der Seitenwandpas-  
sivierung aufgetragenen Seitenwandpassivierschicht (6)  
jeweils während der darauffolgenden Ätzvorgänge auf  
die freigelegten Seitenflächen (7') der Seitenwand (7)  
übertragen werden, wodurch der Gesamtprozeß insge-  
samt anisotrop wird.



DE 196 41 288 A 1

## Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Substraten gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Die Strukturierung von Silicium mittels Plasmaätzverfahren ist bekannt. Bei Plasmaätzverfahren werden in einem Reaktor mit Hilfe einer elektrischen Entladung in einem Reaktivgasgemisch chemisch reaktive Ätzspezies und elektrisch geladene Teilchen, also Ionen, erzeugt. Die so erzeugten, positiv geladenen Ionen werden durch eine elektrische Vorspannung, die am Siliciumsubstrat anliegt, zum Substrat hin beschleunigt und fallen annähernd senkrecht auf die Substratoberfläche ein, wobei sie auf dem Ätzgrund die chemische Umsetzung der reaktiven Ätzspezies mit Silicium fördern. Man unterscheidet zwischen dem ioneninduzierten anisotropen Plasmaätzen, bei dem die Ätzwirkung der Ätzspezies an einen energetischen Ionenfluß zur Substratoberfläche gekoppelt ist und dem spontanen, isotropen Plasmaätzen, bei dem die Ätzspezies keiner oder nur sehr geringer Ionenunterstützung bedürfen. Das ioneninduzierte Plasmaätzen, das im Falle von Silicium als zu strukturierendem Material vorzugsweise mit weniger reaktionsfreudigen Halogenen wie Chlor oder Brom durchgeführt wird, weist vergleichsweise geringe Abtragsraten auf und ist extrem anfällig gegenüber Feuchte und Plasmaverunreinigungen. Das spontane Plasmaätzen, das im Falle von Silicium als zu strukturierendem Material vorwiegend mit Fluorgasen durchgeführt wird, weist dagegen hohe Abtragsraten auf und kann darüber hinaus auf Ionen hoher Energie verzichten. Dadurch sind bei der Suche nach geeigneten Maskenmaterialien lediglich chemische Gesichtspunkte hinsichtlich der Selektivität zwischen Maskierung und zu ätzendem Stoff zu berücksichtigen, wodurch die Auswahlmöglichkeiten wesentlich erweitert werden. Im Falle anderer zu strukturierender Materialien als Silicium ist in vielen Fällen überhaupt nur mit spontan agierender Plasmachemie eine Maskierung möglich. Das Ausmaß erreichbarer Maskenselektivität kann mit diesem Ansatz sehr hoch sein, da bei kleinen Ionenenergien kein oder nur sehr geringer ioneninduzierter oder physikalischer Maskenabtrag stattfindet und rein chemische Reaktionen ausgeprägt materialselektiv sind. Ebenfalls aufgrund der geringen Ionenenergien findet eine Mikromaskierung durch Zerstäubung und Redeposition von abgestäubtem oder zu einem nicht flüchtigen Produkt reagierenden Maskenmaterial auf den Ätzflächen praktisch nicht statt, so daß glatte Ätzflächen ohne störende Strukturen entstehen. Spontan agierende Ätzspezies werden dennoch in Plasmaprozessen kaum oder nur ungern angewendet, da sie aufgrund ihres spontanen Reaktionsverhaltens isotrop, also auch unter den Maskenrändern, ätzen. Für eine genaue Strukturübertragung ist eine hohe Anisotropie ohne Unterätzung der Maske aber zwingend erforderlich.

Eine bekannte Möglichkeit zur Kombination der Vorteile von spontanem und ioneninduziertem Plasmaätzen besteht in der Verwendung eines Seitenwandschutzes durch während des Prozesses abgeschiedenen Dünnfilm. Aus dem Plasma heraus wird die Seitenwand der zu ätzenden Strukturen, auf die nur wenige Ionen einfallen, durch einen Film von anorganischen oder organischen, zum Beispiel polymerem Material, beschichtet und da-

durch vor dem Angriff der spontan agierenden Ätzspezies geschützt. Der Ätzgrund bleibt durch gleichzeitige Einwirkung eines hohen Flusses von Ionen niedriger Energie frei von diesem Schutzfilm und kann daher mit hoher Geschwindigkeit geätzt werden. Dadurch werden anisotrope Profile erhalten und Unterätzungen der Maskenränder vermieden. Als nachteilig erweist sich jedoch bei gleichzeitiger Anwesenheit von schützenden, das heißt passivierenden, und aggressiven, das heißt ätzenden Spezies im Plasma, daß eine starke Rekombination der ungesättigten Passivier- mit den spontan agierenden Ätzspezies diese paarweise eliminiert, indem ein inertes Reaktionsprodukt gebildet wird, was die Dichte der zur Verfügung stehenden aktiven Spezies stark reduziert. Um diese Rekombination von Ätz- und Passivierspezies zu verhindern, werden diese Spezies nach einem Teilaspekt des erfindungsgemäßen Verfahrens getrennt voneinander und alternierend eingesetzt. Da jedoch während der Ätzschritte jeweils ein neuer Seitenwandbereich freigelegt wird, der erst beim nächsten Passivierschritt wieder bedeckt und geschützt werden kann, wäre bei diesem Vorgehen normalerweise eine entsprechend stark ausgeprägte Riefelung der Seitenwand die Folge. Dieser Effekt ist äußerst unerwünscht und würde diese Methode an sich unbrauchbar machen; die Riefelung könnte nach diesem Ansatz nur dadurch vermieden werden, daß die Weite und damit die Zeitdauer des einzelnen Ätzschrittes sehr klein gewählt wird, wodurch aber wieder eine sehr geringe Ätzgeschwindigkeit oder extrem häufiger, kurzzeitiger Wechsel zwischen Ätzen und Passivieren resultiert, was wegen der Gasvolumina in den zu führenden Leitungen und der Plasmakammer auch gar nicht durchführbar wäre, was diese letztere Methode ebenfalls unbrauchbar macht.

## Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren mit den im Hauptanspruch genannten Merkmalen weist demgegenüber den Vorteil auf, daß spontan reagierende Ätzspezies eingesetzt werden, die mit hohen Abtragsraten eine Vielzahl von Materialien, insbesondere Polymere, Metalle oder Mehrkomponentensysteme, anisotrop strukturieren können. In vorteilhafter Weise können schwer ätzbare Substanzen, die bei Raumtemperatur nur wenig flüchtige Verbindungen ausbilden und daher in herkömmlicher Weise durch Einsatz hoher Ionenenergien zerstäubt werden müssen, bei erhöhter Temperatur und niedriger Ionenenergie anisotrop strukturiert werden.

Die Erfindung sieht vor, die während eines Seitenwandpassivierschrittes aufgebrauchte Seitenwandpassivierschicht während des Ätzvorgangs zu einem großen Teil, aber nicht vollständig, wieder abzutragen. Das abgetragene Material verbleibt während des Ätzvorgangs in unmittelbarer Nähe beziehungsweise vor der Seitenwand und wird durch die Art des Abtrags in Richtung des Ätzvorganges vorwärtsgetrieben, wobei es sich unterhalb der ursprünglichen Seitenwandpassivierungskante wieder niederschlagen kann. Die ursprüngliche Seitenwandpassivierschicht wird also abgedünnt und nach unten über die bei Fortschreiten der Ätzung neu entstehenden Seitenwandflächen gezogen, so daß diese unmittelbar bei Freilegung, nicht erst beim nächsten Seitenwandpassivierschritt, geschützt werden. Bei der nächsten Seitenwandpassivierung wird dann jeweils die ursprüngliche und die über der neu gebildeten Seitenwandfläche befindliche Passivierschicht wieder etwa auf

die ursprüngliche Dicke verstärkt, bevor erneut geätzt und die Schicht dabei wieder ein Stück nach unten gezogen wird. Durch diesen Effekt wird ein an sich isotroper Ätzeffekt lokal, nämlich in unmittelbarer Nähe der Passivierschichtunterkante, anisotrop gemacht. Das Vorwärtstreiben der Seitenwandpassivierschicht wird dabei vorwiegend durch eine genau bemessene Dosis / einen genau bemessenen Anteil von Ionen bewirkt, der nicht exakt senkrecht auf den Strukturgrund einwirkt, sondern unter einem kleinen Winkel einfällt und daher auf die Seitenwandpassivierschicht trifft. Ein gewisser Anteil schräg einfallender Ionen ist bei Plasmaätzprozessen stets gegenwärtig und normalerweise äußerst unerwünscht, da er zu einer Ioneninduzierten Seitenwandätzung und damit Maskenrandunterschneidung führt, was einem Verlust an Anisotropie und Strukturtreue gleichkommt. Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird gerade ein genau bemessener Schrägeinfall von Ionen dazu benutzt, um den Schutzfilm kontrolliert vorwärts zu treiben. Ein inhärenter Störeffekt wird so durch Wahl geeigneter Bedingungen unter Kontrolle gebracht und zum Vorteil eingesetzt.

In vorteilhafter Weise werden also die Vorteile isotrop, das heißt spontan agierender Ätzspezies, beibehalten und um das Merkmal der Anisotropie erweitert. Durch die getrennte Anwendung von Ätz- und Passivierspezies in verschiedenen Verfahrensschritten wird die Rekombination und paarweise Auslöschung chemisch aktiver Spezies verhindert. Da spontan agierende Ätzspezies mit sehr hohen Ätzraten eingesetzt werden können, werden die Abtragsraten typischer Ioneninduzierter Prozesse weit übertroffen.

Das erfindungsgemäße Verfahren erweist sich als besonders vorteilhaft, wenn geeignete Maskenmaterialien für schwierige zu ätzende Substanzen gesucht werden, da die Randbedingungen der Maskenauswahl bei spontan agierender Chemie wesentlich weniger Einschränkungen mit sich bringen. Erfindungsgemäß werden nur Ionen geringer Energie eingesetzt, so daß sich eine hohe Selektivität gegenüber einer breiten Palette von Maskenmaterialien ergibt. Da die Ionen geringer Energie das Maskenmaterial nicht schädigen, brauchen bei der Auswahl der Maskenmaterialien nur deren chemische Eigenschaften berücksichtigt zu werden. Ein Ioneninduzierter Maskenabtrag oder Zerstäubung sowie Redeposition der Maske treten kaum auf.

In besonders vorteilhafter Weise kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren anisotrop geätzt werden, wobei gegenüber dem zu ätzenden Material möglichst aggressive, unspezifische, spontan agierende Ätzspezies verwendet werden. Dabei ist es beispielsweise möglich, als Mehrfachkomponentensysteme ausgeführte Substrate, Metalle oder Polymere zu ätzen. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung wird unter einem Mehrkomponentensystem ein Substrat verstanden, das aus unterschiedlichen Materialbestandteilen, zum Beispiel Gallium/Arsen oder Gallium/Aluminium/Arsen aufgebaut ist. Vielen Mehrkomponentensystemen ist gemeinsam, daß ein anisotropes Ätzen mit den dafür herkömmlicherweise verwendeten Ioneninduzierten Ätzspezies nur schwierig durchzuführen ist und niedrige Abtragsraten aufweist. Anisotropes Ätzen in Mehrkomponentensystemen erfordert vielmehr ein durch die vorliegende Erfindung ermöglichtes unspezifisches Ätzen der verschiedenen Materialbestandteile, wobei sich während des Ätzvorgangs keine Anreicherung von beispielsweise Gallium, Aluminium oder Arsen auf dem Strukturgrund bildet. In besonders bevorzugter Weise

können Substrate aus Gallium/Arsen oder Gallium/Aluminium/Arsen bei dem erfindungsgemäßen Verfahren mittels Chlor anisotrop strukturiert werden. Die Erfindung sieht vor, daß in einer derartigen Ausführungsform Passiviergase wie  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y\text{Cl}_z$  oder  $\text{BCl}_3$ , eventuell in Verbindung mit  $\text{SiCl}_4$  für die GaAs/Al-GaAs-Ätzung verwendet werden. Diese Passiviergase führen zur Bildung geeigneter stabiler Seitenwandpassivierschichten, die organische Chlorkohlenstoffe, Chlorkohlenwasserstoffe oder das  $\text{BCl}_3$ -Analogon enthalten und gegebenenfalls durch ein Siliciumgerüst vernetzt werden (bei Zusatz von  $\text{SiCl}_4$ ).

Die Erfindung sieht vorteilhafterweise auch vor, Polymerschichten, vorzugsweise dicke Polymerschichten wie dicke Lacke (Photoresist, Festresist) anisotrop zu ätzen. Die maßgenaue Strukturierung dicker Polymere mit hohem Aspektverhältnis, das heißt, großer Tiefe und geringen Strukturbreiten, zum Beispiel  $> 20:1$ , und senkrechten Seitenwänden ist ein Schlüsselprozeß für additive Verfahren, wo solche Strukturen auf IC-Wafern zunächst als Negativ erzeugt und galvanisch wiederaufgefüllt werden. Nach dem Entfernen der Polymerform verbleibt zuletzt ein freibewegliches Sensorelement — das Positiv durch die "Abformung" — auf aktiver (IC-)Chipfläche, ohne daß ein Eingriff in den Schaltungsprozeß erforderlich ist. Solche additiven Verfahren werden bei der Herstellung von integrierten Sensoren immer wichtiger. Zur Bildung der spontan agierenden Ätzspezies wird vorzugsweise Sauerstoff oder Sauerstoff kombiniert mit fluorliefernden Gasen wie Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) oder Stickstofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ) verwendet. Die eigentlichen Ätzspezies sind dann Fluor- und Sauerstoff-Radikale. Die Seitenwandpassivierschicht muß zum Schutz vor dem Ätzprozeß deutlich anders aufgebaut sein als die zu ätzenden Polymerschichten, aber dennoch einen "weichen" Charakter behalten, um während der Ätzschritte vorwärtsgetrieben werden zu können. Die Seitenwandpassivierschicht enthält daher vorzugsweise neben einem Kohlenstoffgerüst zusätzliche Elemente, die dem Ätzplasma Widerstand leisten, wie beispielsweise Silicium. Silicium enthaltende Polymergerüste, besonders in oxidischer oder azidischer Bindung, sind gegenüber Sauerstoff und Fluor widerstandsfähig und verhindern einen Ätzprozeß an der Polymerseitenwand, erlauben aber einen kontrollierten Abtrag und ein Vorwärtstreiben des Schutzfilms. Erfindungsgemäß sind auch metallhaltige Kohlenwasserstoffe oder Kohlenwasserstoffe mit einem hohen Anteil an aromatischen Ringen (n-Phenyle) als Seitenwandpassiviergase geeignet. In besonders bevorzugter Weise werden Monosilan  $\text{SiH}_4$ , HMDS (Hexamethyldisilan), HMDSO (Hexamethyldisiloxan) oder HMDSN (Hexamethyldisilazan) verwendet, wobei zusätzlich  $\text{SiF}_4$  als "Vernetzer" zugefügt werden kann, um ein Siliciumgerüst zu erzeugen. Auch ein Gemisch von Fluorkohlenwasserstoffen und  $\text{SiF}_4$  oder  $\text{SiH}_4$  führt in entsprechender Weise zur Ausbildung eines siliciumhaltigen organischen Polymermaterials, das den Verfahrensansprüchen genügt ( $\text{C}_x\text{F}_y\text{H}_z + w \cdot \text{SiF}_4 \rightarrow \text{C}_x\text{F}_y\text{H}_z\text{Si}_w + \text{HF}, \text{F}, \text{CF}$  (Siliciumfluorkohlenwasserstoff) + F) (entsprechend für  $\text{SiH}_4$  statt  $\text{SiF}_4$ ). Als Maskerschichten können dann beispielsweise dünne Metallmasken aus Aluminium, Chrom, Nickel etc. oder Plasma-CVD- oder Oxid-Schichten wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  etc. eingesetzt werden.

Die Erfindung wird anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 schematisch das Aufbringen einer Seitenwandpassivierschicht,

Fig. 2 schematisch den Ätzzvorgang mit gleichzeitigem Vorantreiben der Seitenwandpassivierschicht und

Fig. 3 schematisch eine erfindungsgemäß geeignete Ionenverteilung.

Die Fig. 1 zeigt ein Gallium/Arsen-Substrat 2, das mit einer aus beispielsweise Photolack hergestelltem Ätzmaske 4 beschichtet ist, wobei die Ätzmaske 4 den Bereich 5 des Substrats 2 freiläßt, der anisotrop eingätzt werden soll. Die Passivierung der Seitenwand 7 wird mittels eines Passiviergases (x im Oval) durchgeführt, das zum Beispiel ein Gemisch aus  $\text{BCl}_3$  und  $\text{SiCl}_4$  oder  $\text{CCl}_4$  und  $\text{BCl}_3$  etc. sein kann. Das Gemisch besitzt einen Gasfluß von 10–100 sccm und einen Prozeßdruck von  $20 \mu\text{bar} = 2 \text{ Pascal}$ . Über eine Einkopplungsvorrichtung für elektromagnetische Felder, zum Beispiel Mikrowellen wird bei einer Leistung zwischen 500–1000 W ein Mikrowellen- oder ein Hochfrequenzfeld eingestrahlt und damit ein hochdichtes Plasma erzeugt. Während der Passivierung kann gleichzeitig eine Einwirkung von Ionen geringer Energie (+ im Oval) auf die Substrate bewirkt werden. Dadurch wird erreicht, daß auf dem Ätzgrund 5 keine Passivierschicht aufgetragen wird. Die passivierenden Monomere reichern sich bevorzugt an den Seitenwänden 7 an und bilden dort die Seitenpassivierschicht 6. Der Ioneneinfall auf Substrat 2 mit Ionen geringer Energie wird mittels einer Substratelektrode kontrolliert. Dazu wird die Substratelektrode mit einer Hochfrequenzleistung von zum Beispiel 10 W, die eine Substratvorspannung von zum Beispiel 30 V ergibt, beaufschlagt. Die Ionenenergie beträgt dann zum Beispiel ca. 40 eV.

Alternativ kann auch vorgesehen sein, daß während des Passivierschrittes auf eine Bestrahlung mit Ionen geringer Energie verzichtet wird. Während des Passivierschrittes werden also nicht nur die Seitenwand 7, sondern auch der Ätzgrund 5 gleichmäßig mit einer Passivierschicht bedeckt. Die auf dem Ätzgrund 5 aufgebraute Passivierschicht wird während des darauffolgenden Ätzzvorgangs rasch durchbrochen, da die Passivierschicht mit der Ionenunterstützung des Ätzzschrittes sehr schnell abgetragen wird. Die Seitenwand 7 der einzuätzenden Struktur wird nur in vergleichsweise geringem Ausmaß von Ionen getroffen, so daß diese während des Ätzzvorganges durch die Seitenwandpassivierschicht geschützt bleibt. Der Seitenwandeinfall ist aber wichtig für die Erzielung des Vorwärtstreibens des Seitenwandfilms. Er wird kontrolliert durch die Dichte der Ionen, ihrer Beschleunigung zum Substrat und durch den Druck (Stoßraten).

Die Fig. 2 verdeutlicht den Ätzzvorgang des erfindungsgemäßen Verfahrens. Unter dem Einfluß einer Ionenstrahlung geringer Energie (+ im Oval) wird das Substrat 2 der Ätzchemie, dem Ätzplasma, ausgesetzt. Dazu wird ein gegenüber dem Substratmaterial spontan agierendes Ätzspezies, zum Beispiel Chlor (y im Oval), eingesetzt, das einen Gasfluß zwischen 50–200 sccm und einen Prozeßdruck zwischen 10 und  $30 \mu\text{bar} (= 1–3 \text{ Pa})$  aufweist. Die Plasmaerzeugung erfolgt hierbei vorzugsweise mit einer Hochfrequenz- oder Mikrowelleneinstrahlung bei Leistungen zwischen 300–1200 W. An der Substratelektrode liegt eine Substratvorspannung zur Ionenbeschleunigung vor. Die Substratvor-

spannung liegt vorzugsweise zwischen 30–40 V und kann mit einer Hochfrequenzeinspeisung bei Leistungen zwischen 10–15 W erreicht werden. Während des Ätzzvorganges werden mit Hilfe der elektrischen Entladung chemisch reaktive Spezies und elektrisch geladene Teilchen in einem hochdichten Plasma erzeugt. Die so erzeugten positiv geladenen Ionen werden durch die an der Substratelektrode angelegte elektrische Vorspannung zum Substrat 2 hin beschleunigt, fallen annähernd senkrecht auf die durch die Ätzmaske 4 freigelassene Substratoberfläche 5 ein und unterstützen die chemische Umsetzung des reaktiven Plasmaspezies mit dem Gallium/Arsen-Substrats 2. Das reaktive Plasmaspezies ätzt isotrop und unspezifisch das Mehrkomponentensystem weg. Die Seitenwand 7 des Substrates 2 wird durch die Seitenwandpassivierschicht 6 geschützt. Da Chlor gegenüber AlGaAs (nicht gegenüber Silicium, wie in der Einleitung beschrieben) ein spontan agierendes Ätzspezies darstellt, kann auf eine Initiierung oder Unterstützung durch Ioneneinfall für den Ätzzvorgang an sich verzichtet werden. Der Ioneneinfall ist jedoch nötig, um die Seitenwandpassivierschicht 6 voranzutreiben, den Ätzgrund 5 von Depositionen aus dem Plasma freizuhalten und, falls während der Passivierung auf Ionenunterstützung verzichtet wurde, die auf dem Ätzgrund 5 befindliche Passivierschicht abzutragen und zu durchbrechen. Unter einem kleinen Winkel zu senkrecht einfallende Ionen (Winkel  $\alpha$  in Fig. 3) einfallende und daher auf die Seitenwandpassivierschicht 6 auftreffende Ionen unterstützen den Abtrag der teilweisen Seitenwandpassivierschicht 6 und führen zu deren Verdünnung 6'. Während des Ätzzvorganges wird der Ätzgrund 5 um die Tiefe T nach unten weggeätzt, so daß eine ursprünglich von der Seitenwandpassivierschicht 6 nicht bedeckte Fläche 7' der Seitenwand 7 gebildet wird. Die durch die überwiegend durch schräg einfallende Ionen freigesetzten Polymercluster der Seitenwandpassivierschicht 6 haben die Tendenz, sich unmittelbar benachbart niederschlagen und bedecken nun als Anteile der ursprünglichen Seitenwandpassivierschicht 6 enthaltende Passivierschicht 8 die freigelegte Fläche 7' der Seitenwand 7, so daß diese bereits unmittelbar bei Freilegung, nicht erst beim nächsten Passivierschritt, geschützt wird. Ein isotropes Anätzen der Fläche 7' und damit eine Riefelung der Seitenwand wird vermieden.

Der kontrollierte Schrägeinfall niederenergetischer Ionen auf die Substratoberfläche wird erreicht durch eine Kombination von Prozeßdruck, Plasmadichte und damit Stoßrate im Plasma (das heißt, Höhe der eingestrahnten HF- (Hochfrequenz) beziehungsweise Mikrowellenleistung in die hochdichte Plasmaquelle) und der Ionenbeschleunigungsspannung an der Substratelektrode sowie deren zeitliches Verhalten. Bei Prozeßdrücken zwischen 10 und  $100 \mu\text{bar}$ , vorzugsweise von  $20 \mu\text{bar}$ , sowie bei einer hohen Ionendichte von  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  bis  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , vorzugsweise von  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , bildet sich ein divergenter Ionenfluß aus infolge der gegenseitigen Abstoßung der positiv geladenen Spezies von sehr hoher Dichte, sowie infolge einer Diffusion von Ionen aus Bereichen hoher Ionendichte in Bereiche niedriger Ionendichte, wie sie um den Wafer herum liegen. Dieser divergente Ionenfluß zum Substrat wird durch die Beschleunigungsspannung zum Substrat hin wiederum gebündelt, so daß ein mehr oder weniger gerichteter Ionenstrom auf die Substratelektrode einfällt. Je höher die Ionenbeschleunigungsspannung in Relation zur Ionendichte gewählt wird, umso schärfer gebündelt erscheint die Richtungsverteilung (Fig. 3:n( $\alpha$ ))

der Ionen, das heißt, umso weniger schrägeinfallende Ionen werden beobachtet. Die Anzahl der Ionen bei einem bestimmten Winkel  $\alpha$  verringert sich und verschiebt sich in Richtung kleinerer Winkel (Fig. 3). Mit höherer Energie nimmt aber auch die Abtragswirkung der Ionen, das heißt ihre Zerstörungskraft für den Seitenwand-Film, beim Schrägeinfall auf die Seitenwand zu, was deren geringere Anzahl unter diesem Winkel zum Teil wiederum kompensiert. Infolgedessen steht ein relativ breites Prozeßfenster zur Verfügung, in dem der Mechanismus brauchbar funktioniert (Spannungen zwischen 10 und 100 V, vorzugsweise 30–50 V) und der Einfluß auf das Prozeßergebnis eine stetige Funktion ist, was eine einfache Optimierung über die Profilform ermöglicht. Wird die Substratvorspannung wie allgemein üblich durch eine HF-Leistung an der Substratelektrode bewirkt, ist auch der Ionenfluß im Bereich der Nulldurchgänge dieser HF-Spannung zu berücksichtigen, innerhalb dem jeweils sehr niederenergetische Ionen mit hoher Divergenz auf die Waferoberfläche einfallen und diese entladen (Plasma hoher Dichte).

Der Ätzschrift kann beispielsweise solange durchgeführt werden, bis eine Ätztiefe von ca. 2 bis 3  $\mu\text{m}$  Tiefe erreicht ist. Dies erfordert bei den hohen Abtragsraten aus hochdichten Plasmen eine Zeit für den Ätzschrift von zum Beispiel 6 Sekunden bis 1 Minute.

In einem daran anschließenden Passivierungsschritt wird dann jeweils die letztmalig aufgetragene verdünnte Seitenwandpassivierschicht 6' und die über der neugebildeten Seitenwandfläche 7' befindliche Passivierschicht 8 wieder auf die ursprüngliche Dicke der Seitenwandpassivierschicht 6 verstärkt, bevor erneut geätzt und die Seitenwandpassivierschicht 6 wieder ein Stück nach unten verlagert wird. Der Ätzbvorgang und die Passivierung wird so oft alternierend wiederholt, bis die vorherbestimmte Ätztiefe der Strukturen im Substrat erreicht ist. Die Dauer der einzelnen Ätzbvorgänge liegt zum Beispiel bei einem mikrowellenunterstützten Verfahren (zur Erzeugung hochdichten Plasmas), das eine Ätzrate zwischen 2 und 20  $\mu\text{m}/\text{min}$ . ermöglicht, so, daß pro Ätzschrift zum Beispiel 2 bis 3  $\mu\text{m}$  Tiefe weitergeätzt wird. Die Passivierung wird solange durchgeführt, bis eine ca. 5–200 nm, vorzugsweise 50 nm, starke Seitenwandpassivierschicht 6 abgeschieden ist, die sich aus den beschriebenen Spezies zusammensetzt. Dafür wird in der Regel eine Zeit von 5 Sekunden bis zu 1 Minute benötigt.

In vorteilhafter Weise kann ein anisotropes Ätzen mit sehr geringen Ionenenergien erreicht werden. Soll während der Passivierung auf dem Ätzgrund 5 keine Passivierschicht aufgetragen werden, genügen dazu im Prinzip bereits Ionenenergien von nur ca. 10–20 eV. Während des Ätzbvorganges ist erfindungsgemäß vorgesehen, eine Ionenbestrahlung mit Energien zwischen 30 und 50 eV durchzuführen, um den Strukturgrund von Depositionen aus dem Plasma frei zuhalten und die Seitenwandfilmdynamik aufrechtzuerhalten.

Da das erfindungsgemäße Verfahren hohe Ätzraten vorsieht, kann es zu einer Erwärmung des Substrates kommen. Daher ist es notwendig, für eine Kühlung der Substrate zu sorgen. Dies kann beispielsweise durch Kühlung der Substratrückseite durch einen Heliumgassstrom, durch ein Elastomer oder durch Aufkleben der Substrate auf eine gekühlte Elektrode erreicht werden.

Erfindungsgemäß ist es wesentlich, daß die eingesetzten Plasmaquellen hohe Dichten von reaktiven Spezies und Ionen bei gleichzeitig geringer, aber exakt kontrollierbarer Energie, mit der die erzeugten Ionen die Sub-

strate erreichen, aufweisen. Die Ionenenergie muß mit Rücksicht auf eine hohe Maskenselektivität so klein wie möglich gehalten werden. Hohe Ionenenergien führen zudem zu störenden Rückwirkungen von zerstäubten oder abgetragenen und unkontrolliert redeponierten Materialien. Selbstverständlich muß die Energie der auf das Substrat einwirkenden Ionen ausreichen, um den Strukturgrund von Depositionen freizuhalten und so einen glatten Ätzgrund zu erzeugen.

#### Patentansprüche

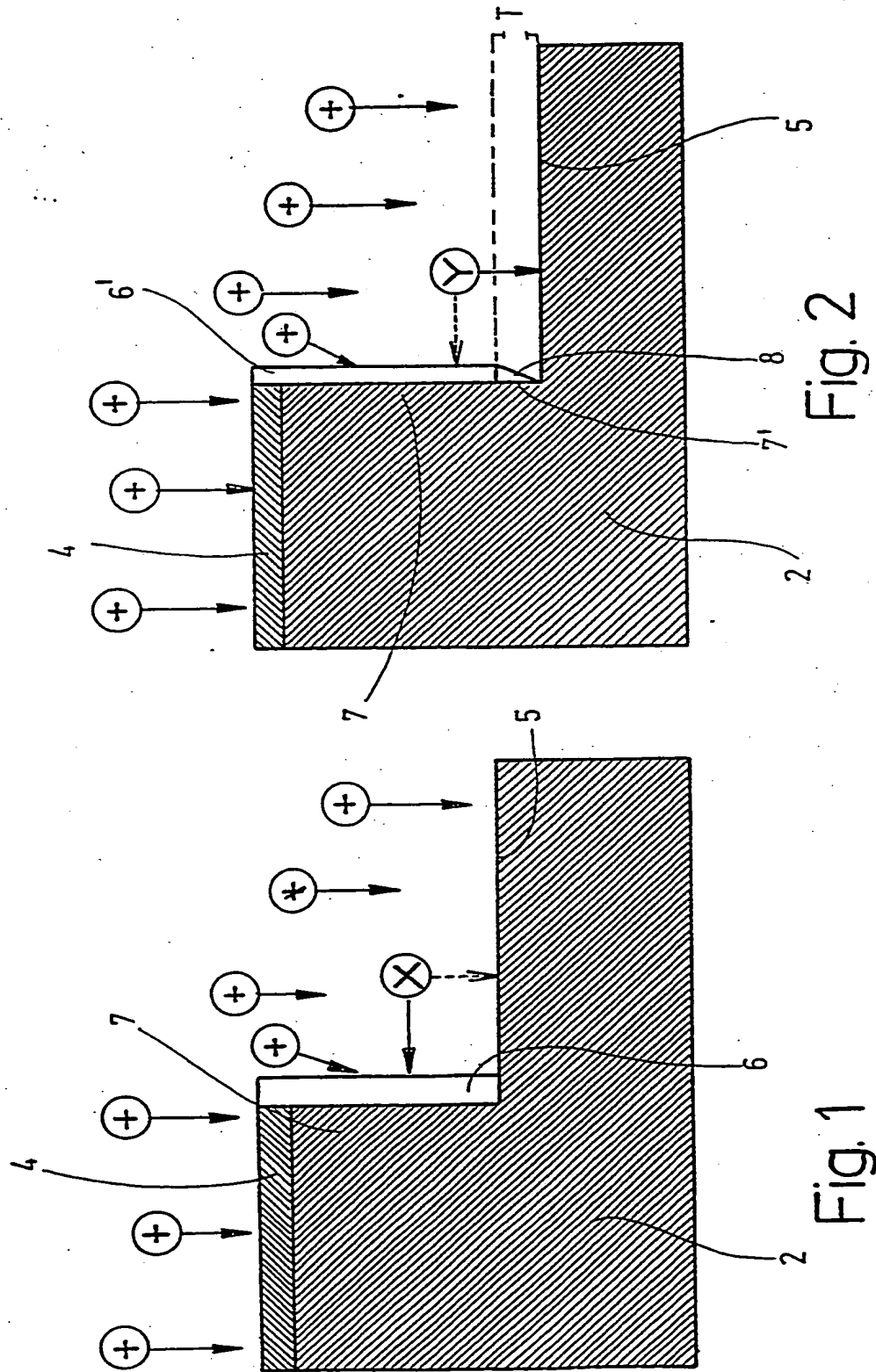
1. Verfahren zur Herstellung von geätzten Strukturen in Substraten mittels anisotropen Plasmaätzens, wobei getrennt voneinander und alternierend ein an sich isotroper Ätzbvorgang und eine Seitenwandpassivierung durchgeführt wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (2) ein Polymer, ein Metall oder ein Mehrkomponentensystem ist und Anteile (8) der während der Seitenwandpassivierung aufgetragenen Seitenwandpassivierschicht (6) jeweils während der darauffolgenden Ätzbvorgänge auf die freigelegten Seitenflächen (7') der Seitenwand (7) übertragen werden, wodurch der Prozeß insgesamt anisotrop gemacht wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schrägeinfall von Ionen auf die Seitenwände der zu erstellenden Strukturen durch eine geeignete Kombination hoher Plasmadichte, niedrigem Prozeßdruck und niedriger Ionenbeschleunigung (-spannung) gesteuert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (2) während des Ätzbvorganges einem Einfall von Ionen mit niedriger Energie ausgesetzt wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (2) während der Seitenwandpassivierschritte einem Einfall von Ionen niedriger Energie ausgesetzt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß während der Passivierschritte die Ionenenergie sehr klein ist und keine effektive Ionenbeschleunigung bewirkt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Seitenwandpassivierschicht (6) während der Ätzschriffe durch einen relativ geringen, aber exakt kontrollierten Anteil schräg einfallender Ionen, vorzugsweise mit niedriger Energie, teilweise abgetragen, in Richtung des Ätzbvorganges verlagert und so während des Ätzbvorganges freigelegte Seitenflächen (7') geschützt werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Mehrkomponentensystem aus Gallium/Arsen oder Aluminium/Gallium/Arsen aufgebaut ist.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Polymer ein dicker Photoresist ("Photolack") oder ein Festresist ist.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Ätzbvorgang mittels eines gegenüber dem zu ätzenden Medium spontan agierenden Ätzespezies durchgeführt wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Ätzbvorgang mittels Chlor, Sauerstoff, einem fluorliefernden Gas, Sauerstoff zusammen mit einem fluorliefernden Gas, zum Beispiel Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), Stick-

- stofftrifluorid ( $\text{NF}_3$ ) oder Tetrafluormethan ( $\text{CF}_4$ ) durchgeführt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das fluorliefernde Gas mit Argon oder einem anderen Inertgas wie Helium oder Xenon versetzt wird. 5
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Seitenwandpassivierung mittels Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ), Trichlormethan ( $\text{CHCl}_3$ ),  $\text{C}_x\text{H}_y\text{Cl}_z$ ,  $\text{BCl}_3$ , Siliciumtetrachlorid ( $\text{SiCl}_4$ ), Trifluormethan ( $\text{CHF}_3$ ), Siliciumtetrafluorid  $\text{SiF}_4$ , Silan  $\text{SiH}_4$  oder Gemischen aus Halogen-Kohlenwasserstoffen und  $\text{SiF}_4/\text{SiCl}_4$ , Silan  $\text{SiH}_4$ , Hexamethyldisilan (HMDS), Hexamethyldisiloxan (HMDSO), Hexamethyldisilazan (HMDSN), metallhaltigem Kohlenwasserstoff, Fluorkohlenwasserstoffen, Kohlenwasserstoff mit einem hohen Anteil aromatischer Ringe, perfluorierten Aromaten, perfluorierten Styrolderivaten oder Fluoräthervverbindungen durchgeführt wird. 10 15 20
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Ionenenergie während des Ätzworganges 10 bis 100, vorzugsweise 30 bis 50 eV beträgt.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Ionenenergie während der Seitenwandpassivierung 10 bis 50, vorzugsweise 30–40 eV beträgt. 25
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Ionenenergie während der Seitenwandpassivierung 0–10 eV beträgt und keine Biasspannung erzeugt wird. 30
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die für den Ätzworgang und die Seitenwandpassivierung eingesetzten Medien während des Ioneneinfalls Gasflüsse von 10 bis 200 sccm und Prozeßdrücke von 10 bis 100  $\mu\text{bar}$  (1–10 Pascal) aufweisen (im Auszustand jeweils 0). 35
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmaerzeugung durch Mikrowelleneinstrahlung beziehungsweise Hochfrequenzeinstellung (HF) bei Leistungen von 100 bis 1.500, vorzugsweise 300 bis 1.200 Watt erfolgt. 40 45
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat während des Ätzworganges und/oder der Passivierung der Seitenwand gekühlt wird.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß der Ätzworgang und die Passivierung mit einer hohen Plasmadichte an reaktiven Spezies und Ionen durchgeführt wird. 50
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Ionendichte, die Ionenenergie und die Relation geladener (= Ionen) zu ungeladener Teilchen (= Neutralspezies) unabhängig voneinander geregelt wird. 55

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

60

65



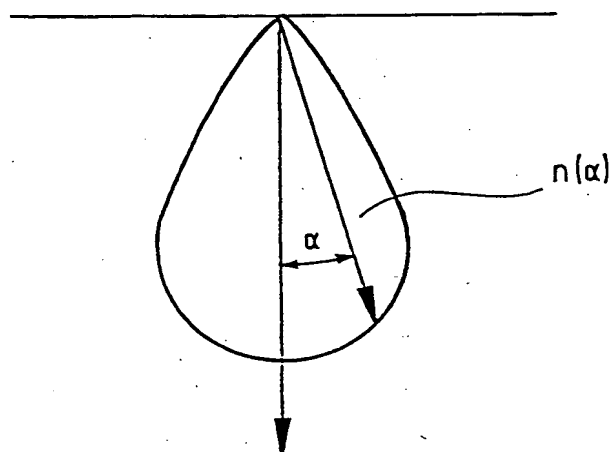


Fig. 3